

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСПЫЛИТЕЛЯ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ И ФЕРТИГАЦИИ

MODELING A PNEUMOHYDRAULIC SPRAYER FOR IRRIGATION AND FERTIGATION

В.П. ГОРОБЕЙ¹, д.т.н.
В.Ю. МОСКАЛЕВИЧ², к.т.н.

¹ Всероссийский национальный научно-исследовательский институт виноградарства и виноделия «Магарач» РАН, Ялта, Республика Крым, Россия, magarach@rambler.ru

² Академия биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ имени В.И. Вернадского», п. Аграрное, Республика Крым, Россия, kaf-meh@rambler.ru

V.P. GOROBEJ¹, DSc in Engineering
V.YU. MOSKALEVICH², PhD in Engineering

¹ Federal State Budgetary Institution of Science «All-Russian National Scientific Research Institute of Vinegraphy and Wine-making “Magarach”» RAS, the Republic of Crimea, Yalta, Russia, magarach@rambler.ru

² Academy of Bioresources and Nature Management of V.I. Vernadsky Crimean Federal University, the Republic of Crimea, Agrarnoe, Russia, kaf-meh@rambler.ru

С целью повышения надежности и эффективности распылителей жидкости для орошения и фертигации сельскохозяйственных культур произведено моделирование конструкционных и геометрических параметров распылителей дождевателя. Проанализирован наиболее распространенный способ полива – дождевание. Показана необходимость модернизации конструкций распыливающих насадок для улучшения качества искусственного дождя. Разработаны: принципиально новая схема распыливающего устройства – дождевателя – и математическая модель для теоретико-технологического обоснования основных его параметров: диаметров сопел водоводного и воздуховодного штуцеров, диаметра и длины камеры смешения, а также необходимых давлений воды и воздуха. Приведено обоснование конструктивных решений пневмогидравлического распылителя. Разрушение сплошности потока жидкости в распылителе рассмотрено с учетом параметра ее прочности при взаимодействии гетерогенных фаз воды и воздуха. При этом подача воздуха для распыления жидкости может осуществляться как принудительно, так и эжекцией. Моделирование процесса работы пневмогидравлического распылителя выполнено в табличном процессоре (Excel или WPS) с использованием математических выражений обоснования основных конструктивно-технологических параметров устройства. Получены графические зависимости для оптимизации технологических параметров и конструктивных решений с целью разработки, изготовления макетного образца пневмогидравлического дождевателя и его экспериментальной апробации. Использование нового устройства обеспечит получение капель искусственного дождя различной крупности при орошении и фертигации сельскохозяйственных культур, что будет способствовать успешному решению обсуждаемых проблем АПК.

Ключевые слова: орошение, пневмогидравлический дождеватель, камера смешения, математическая модель, расчет, конструкция, параметры, эжекция, распыление.

The aim of the research was to increase the efficiency of use and the ability to control liquid spraying when creating artificial rain in medium to reduce energy consumption, to increase the reliability of the device for irrigation of crops, which combines additional processing of plants with various technologies for growing them by creating the necessary conditions for the formation of a water-air stream due to substantiation of the structural and geometric design parameters of sprayer. The most common irrigation method called the sprinkling is analyzed. The need to increase the economic efficiency of spray nozzle designs to improve the quality of artificial rain is shown. A fundamentally new scheme of the spraying device for innovative irrigation technologies and a mathematical model for the theoretical and technological substantiation of its main parameters: the diameters of the nozzles of the water and air nozzles, the diameter and length of the mixing chamber, as well as the necessary water and air pressures, are developed. The rationale for the design decisions of the pneumohydraulic sprayer is given. The destruction of the continuity of the liquid in the atomizer is considered taking into account the parameter of its strength during the interaction of heterogeneous phases of water and air. In this case, the air supply for spraying the liquid can be carried out either by force or by ejection. The algorithm for calculating the parameters of the spraying device is executed and works in a spreadsheet (EXCEL or WPS) using the mathematical expressions justified for the main structural and technological parameters of the device. The initial data are the pressure of water p_1 and air p_2 at the inlet of the sprayer, the required water flow rate G_1 and the ejection coefficient u . The calculations take into account the flow coefficients of water and air μ , the gas constant R and the air temperature T . The calculation results are displayed in EXCEL tables. Based on the results of mathematical modeling of the operation of the pneumohydraulic sprayer there were obtained the graphical dependencies to optimize its technological parameters and design solutions for the development, manufacture of a pneumohydraulic sprayer prototype and its experimental testing to obtain droplets of artificial rain of various sizes during irrigation and fertigation of crops, which will contribute to a successful solution of discussed agroindustrial complex problems.

Keywords: irrigation, pneumohydraulic sprayer, mixing chamber, mathematical model, calculation, design, parameters, ejection, spraying.

Введение

Многолетний опыт использования дождевого полива подтвердил его высокую эффективность. В процессе развития дождевого орошения совершенствовались и продолжают совершенствоваться обеспечивающие его средства и технологии, при этом подтверждается его очевидная перспективность. Подача минеральных компонентов в поливную воду осуществляется с требуемой частотой и дозировкой. Фертигация получила широкое распространение в связи с переходом на более эффективные способы поддержания почвенного режима питания и рационального использования удобрений. Качество фертигации зависит от эффективности смешения удобрения с оросительной водой для нужд растений.

С целью усовершенствования устройств создания искусственного дождя для инновационных технологий были предложены «пневмогидравлические установки», основной отличительной особенностью которых является подведение в водопроводящий пояс дождевальной машины сжатого воздуха по воздухопроводу от компрессора. Воздуховод заканчивается соплом, из которого под определенным давлением выходит сжатый воздух. В результате образования вокруг сопла области пониженного давления выходящий сжатый воздух смешивается с окружающей средой, образуя водовоздушную смесь. Для создания необходимых условий образования водовоздушной струи сопло в устройстве перенесено внутрь объема воды, ограниченного стенкой водопроводящего пояса с выходным отверстием напротив сопла. При этом функцию дефлектора выполняет окружающая среда – воздух – по принципу струйных аппаратов [1, 2]. Для работы по описанному принципу ранее нами также было разработано техническое решение для получения водовоздушной смеси [3].

Повышение эффективности использования и надежности пневмогидравлических устройств создания дождя, качества искусственного дождя, возможности регулирования равномерности распределения капель в пространстве и снижение энергозатрат является актуальной задачей. Изучение условий пневмогидравлического орошения, обоснование конструктивных и геометрических параметров устройств получения искусственного дождя регулируемой дисперсности позволит повысить эффективность полива сельско-

хозяйственных культур, обеспечит совмещение подкормки и химзащиты растений при искусственном дождевании для различных технологий их выращивания.

Цель исследований

Моделирование конструкционных и геометрических параметров конструкции распылителей дождевателя для орошения и фертигации сельскохозяйственных культур.

Анализ исследований и публикаций

Согласно теоретическим представлениям, жидкости могут выдерживать большие растягивающие напряжения, достигающие 100...1000 МПа [4–6]. Но, как показывают эксперименты [7–9], в реальных жидкостях эти величины значительно меньше, что объясняется наличием в них гетерогенных очагов (границ, твердых включений, газовых пузырьков и др.), на которых инициируется рост пор, являющийся механизмом разрушения жидкостей. Разрушение метастабильного состояния жидкости происходит в результате роста пор, существующих в жидкости и порождаемых тепловыми флуктуационными процессами [10]. При этом из всех содержащихся в жидкости примесей существенное влияние на ее прочность могут оказать только пузырьки, находящиеся в объеме жидкости или в мелких трещинах нерастворимых частиц [9]. Газовый пузырек – слабое место в структуре жидкости, определяющее ее прочность [11, 12]. Согласно теории прочности жидкости Я.Б. Зельдовича, разрушение жидкости наступает вследствие развития газовых пузырьков. Увеличиваясь, пузырьки как бы расчленивают жидкость. При этом, чем больше размеры газовых пузырьков, тем сильнее они уменьшают прочность жидкости [4].

Другим механизмом разрывов сплошности жидкости является кавитация, которая возникает при резком снижении давления в потоке движущейся жидкости [13]. Пузырьки воздуха, распределяясь в воде, вызывают значительное увеличение поверхностной энергии, т.е. «разрывают» воду и приводят к снижению ее эффективной прочности. Кроме того, пузырьки воздуха сжимаются до давления воды в распылителе, и воздух частично растворяется. При истечении из распылителя давление водовоздушной смеси почти мгновенно сравнивается с давлением окружающей среды, и пузырьки

резко расширяются (взрываются). Растворенный в воде воздух начинает десорбироваться и водовоздушная смесь как бы вскипает. Весь этот комплекс явлений приводит к повышению эффективности дробления вытекающей из распылителя воды.

Таким образом, предварительное газонасыщение распыливаемой воды приводит к увеличению КПД распыливания и существенному снижению расхода воздуха и энергии по сравнению с расходом при пневматическом распыливании [14]. Перспективным, с точки зрения расширения диапазона регулирования размеров капель воды, разбрызгиваемых дождевателями, является использование в их конструкции аэраторов с эффектом эжекции. Такие устройства при простоте конструкции позволяют получать водовоздушную смесь, легко распадающуюся на капли при выходе из сопла дождевателя в воздух, без дополнительных затрат механической энергии [15].

Материалы и методы

Анализ конструкций дождевальных машин, технологического оборудования и насадок для получения искусственного дождя. Математическое моделирование рабочего процесса для обоснования геометрических и технологических параметров пневмогидравлического устройства создания искусственного дождя с целью повышения эффективности использования и надежности устройства, качества искусственного дождя, создания возможности регулирования равномерности распределения капель дождя в пространстве и снижения энергозатрат.

Результаты и обсуждение

Основываясь на вышеприведенных теоретических предпосылках, предлагается обоснование конструктивно-технологической схемы (рис. 1) и параметров распыливающего жидкую фазу устройства дождевателя, отличительной особенностью которого является эжекция воздушной фазы [16].

Для наиболее эффективного распыливания воды дождевателем его конструкция должна обеспечивать насыщение воды воздухом и значительный перепад давления на выходе водовоздушной смеси из сопла форсунки. Насыщение воды воздухом может осуществляться как принудительным его вводом под давлением в камеру смешивания, так и за счет его

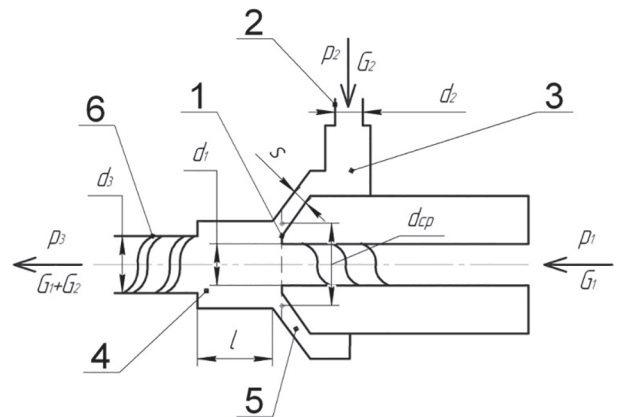


Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема распыливающего устройства пневмогидравлического дождевателя

эжекции. В последнем случае струя воды создает разрежение в камере смешения, и воздух всасывается из атмосферы.

Площадь поперечного сечения f_1 сопла водяного штуцера 1 найдем из уравнения для расхода воды G_1 через сопло [17]:

$$f_1 = \frac{G_1}{\mu \sqrt{2 p_1}}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент расхода, значение которого всегда меньше 1; p_1 – давление воды, Па.

Если отверстие сопла водяного штуцера круглого сечения диаметром d_1 , то:

$$f_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}. \quad (2)$$

Из выражения (2) с учетом (1) получим:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 G_1}{\pi \mu \sqrt{2 p_1}}}. \quad (3)$$

Массовый расход воздуха, поступающего из атмосферы через воздушную камеру 3 в камеру смешения 4 аэратора, определяется по формуле [18]:

$$G_2 = \mu f_2 p_2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{1}{RT_2} \left(Y^{\frac{2}{k}} - Y^{\frac{k+1}{k}} \right)}, \quad (4)$$

где μ – коэффициент расхода, значение которого всегда меньше 1; f_2 – площадь поперечного сечения воздушного штуцера 2; k – показатель адиабаты (обычно принимается $k = 1,4$); R – газовая постоянная в (Н·м)/(кг·град); T – абсолютная температура воздуха в К; Y – отношение давлений p/p_2 ; p – давление в воздушной камере дождевателя, Па.

Коэффициент μ определяется обычно из эксперимента или по справочным данным и учитывает факторы, которые не были учтены при выводе формулы (4). Показатель адиабаты k принимается равным 1,4. Для этого значения k имеются таблицы функции:

$$\varphi(Y) = \sqrt{Y^{\frac{2}{k}} - Y^{\frac{k+1}{k}}}, \quad (5)$$

которая называется функцией расхода.

Функция расхода φ при критическом отношении давлений Y^* по формуле (5) при $k = 1,4$ имеет значение $\varphi(Y) = 0,2588$ [18].

Критический расход G^* находим по формуле (4) при $k = 1,4$ и $\varphi(Y) = 0,2588$:

$$G^* = \mu f_2 p_2 \sqrt{\frac{0,469}{RT_2}}. \quad (6)$$

Зависимость (4) для определения расхода воздуха справедлива только в интервале значений Y от 1 до того значения Y^* , при котором расход G_2 становится максимальным. Это значение $Y = Y^*$ называется критическим. Если принять $k = 1,4$, то $Y^* = 0,528$.

Для того чтобы можно было регулировать степень насыщения воды воздухом в аэраторе, массовый расход воздуха, поступающего из атмосферы в камеру смешения 4 аэратора, должен зависеть от отношения давлений Y . В соответствии с работой Н.И. Левицкого [18], такой режим работы возможен в интервале изменения Y от 0,528 до 1. Максимальный расход воздуха $G_2 = G^*$.

Из уравнения (6), с учетом $G_2 = G^*$, выразим величину сечения кольцевого зазора 5 на входе в камеру смешения 4 дождевателя:

$$f_2 = \frac{G_2}{\mu p_2} \sqrt{\frac{RT_2}{0,469}}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) найдем средний диаметр кольцевого зазора:

$$d_{cp} = \frac{f_2}{\pi s}. \quad (8)$$

где s – ширина кольцевого зазора.

Чтобы вода из камеры смешения 4 дождевателя не попадала в воздушную камеру 3 дождевателя, необходимо, чтобы расход воздуха, засасываемого через кольцевой зазор 5 в камеру смешения 4 аэратора, компенсировался расходом воздуха, поступающим из атмосферы в воздушную камеру 3 дождевателя. Это обеспечивается равенством сечений коль-

цевого зазора 5 на входе в камеру смешения дождевателя и отверстия воздушного штуцера 2 на входе в воздушную камеру дождевателя. Тогда диаметр отверстия воздушного штуцера 2 определится по формуле:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4f_2}{\pi}}. \quad (9)$$

По результатам расчетов с использованием выражений (7)–(9) построены графики зависимости среднего диаметра f_c кольцевого зазора и диаметра d_2 отверстия воздушного штуцера от расхода воды G_1 с учетом расходов эжектируемого воздуха при нормальных атмосферных условиях для значений коэффициента эжекции 0,5; 0,7 и 0,9.

Согласно современным теоретическим представлениям о работе водовоздушных эжекторов [14], справедлива следующая зависимость, выражающее объемное соотношение подаваемой воды и эжектируемого воздуха:

$$u = K \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_3 - p_2}}, \quad (10)$$

где K – постоянная, зависящая от конструкции и режима работы эжектора; $(p_1 - p_2)$ – перепад давлений на срезе сопла 1; $(p_3 - p_2)$ – перепад давлений, создаваемый эжектором.

Площадь сечения f_{cm} камеры смешения 4 определим из соотношения:

$$\frac{f_{cm}}{f_1} = K \frac{p_1 - p_2}{p_3 - p_2}, \quad (11)$$

отсюда, в случае цилиндрической формы камеры смешения 4, ее диаметр:

$$d_{cm} = K d_1 \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_3 - p_2}}. \quad (12)$$

Диаметр выходного сопла определим по выражению:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4G_1(1+u)}{\pi \mu \sqrt{2} p_3}}. \quad (13)$$

Длина l камеры смешения 4 должна быть достаточной для завершения смешения. По результатам исследований [19], оптимальная длина камеры смешения находится из соотношения:

$$\left(\frac{l}{d_1}\right)_{opt} = 15 \left(\frac{f_3}{f_1} - 1\right).$$

№	A	B	C	D	E	F	G	H
1	давление воды	коэф. расхода	расход воды	диаметр сопла вод.штуцера			давление воздуха	давление на выходе
2	p1, Па	μ	G1, л/с	d1	мм		p2, Па	p3, Па
3	250000	0,9	0,001	1,414821	1,35178	1,300677	101325	101800
4	300000		0,002	2,000859	1,911706	1,839435		
5	350000		0,003	2,450541	2,341352	2,252838		
6			0,004	2,829641	2,703561	2,601354		
7			0,005	3,163635	3,022673	2,908402		
8			0,006	3,465589	3,311172	3,185995		
9			0,007	3,743264	3,576474	3,441267		
10			0,008	4,001717	3,823412	3,67887		
11			0,009	4,244462	4,055341	3,902031		
12			0,01	4,474056	4,274705	4,113101		

№	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	Q
1	Диаметр камеры смешения			Диаметр выходного сопла			длина камеры смешения			
2	dсм	мм		d3	мм		l	мм		
3	25,03073	23,91543	23,011	2,441329	2,309266	2,169178	15,39762	14,36228	13,02751	02751
4	35,3988	33,82153	32,543	2,963661	2,743817	2,50475	14,44203	12,48166	9,979735	79735
5	43,3545	41,42275	39,857	3,406829	3,118389	2,800396	14,34431	11,65556	8,213367	13367
6	50,06147	47,83087	46,023	3,798642	3,45256	3,06768	14,53501	11,235	6,9949	5,9949
7	55,97042	53,47654	51,455	4,153659	3,757126	3,313473	14,85035	11,0168	6,076074	76074
8	61,31253	58,58061	56,366	4,480634	4,038789	3,542252	15,22568	10,91425	5,343863	43863
9	66,2251	63,27429	60,882	4,785319	4,30205	3,757126	15,63083	10,88364	4,737874	37874
10	70,79761	67,64306	65,086	5,071733	4,550105	3,960358	16,05024	10,9004	4,22329	22329
11	75,0922	71,7463	69,034	5,342815	4,785319	4,153659	16,4753	10,94967	3,774424	74424
12	79,15413	75,62724	72,768	5,600792	5,009501	4,338355	16,90105	11,02195	3,378807	78807

Рис. 2. Фрагмент таблицы Excel с результатами расчета параметров распылителя

Отсюда при круглой форме отверстий водяного штуцера и выходного сопла б аэратора:

$$l = 15d_1 \left(\frac{d_3}{d_1} - 1 \right). \quad (14)$$

Алгоритм расчета параметров распыливающего устройства дождевателя выполнен и работает в табличном процессоре (Excel или WPS) с использованием выражений (3), (7)–(9), (13)–(15). Исходными данными являются давление воды p_1 и воздуха p_2 на входе дождевателя, необходимый расход воды G_1 и коэффициент эжекции u . В расчетах учитываются коэффициенты расхода μ воды и воздуха, газовая постоянная R и температура воз-

духа T . Результаты расчетов выдаются в виде таблиц Excel (рис. 2).

По результатам расчетов построены графики зависимостей среднего диаметра d_c кольцевого зазора, диаметра выходного сопла d_3 распылителя, диаметра $d_{см}$ и длины l камеры смешения от расхода воды G_1 для значений давления воды p_1 ($p_1 = 0,25; 0,30; 0,35$ МПа), используемых в современной оросительной технике с учетом расходов эжектируемого воздуха при нормальных атмосферных условиях для значений коэффициента эжекции: 0,5; 0,7 и 0,9 (рис. 3–7).

Из представленных на рис. 3–7 графиков видно, что для эффективного распыливания воды при поливе необходимо оснащать дождеватели распыливающими устройствами с диаметрами выходного сопла $d_3 = (2,5...5,5)$ мм и камеры смешения $d_{см} = (5...15)$ мм. При этом конструкция распыливающих устройств дождевателя должна обеспечивать возможность регулировки среднего диаметра f_c кольцевого зазора в пределах от 5 до 12 мм и длины l камеры смешения – от 11 до 17 мм.

Для лучшего смешения воды с воздухом в камере смешения дождевателя предлагается использовать принцип закручивания потока воды без разрыва его сплошности. При этом учитываются результаты гидродинамических исследований по определению геометрических

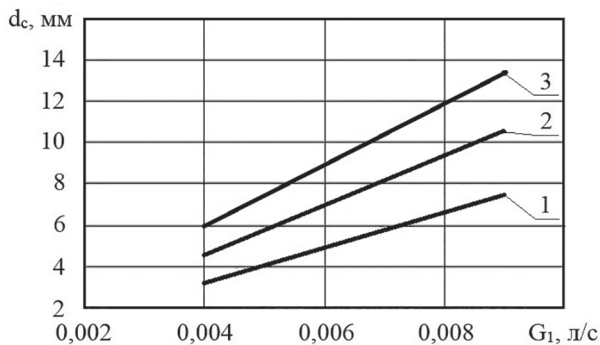


Рис. 3. Зависимость среднего диаметра d_c кольцевого зазора от расхода воды G_1 при коэффициентах эжекции: 1 – $u = 0,5$; 2 – $u = 0,7$; 3 – $u = 0,9$

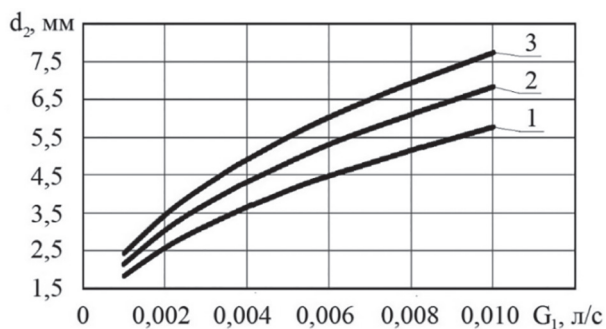


Рис. 4. Зависимость диаметра d_2 воздушного штуцера от расхода воды G_1 при коэффициентах эжекции: 1 - $u = 0,5$; 2 - $u = 0,7$; 3 - $u = 0,9$

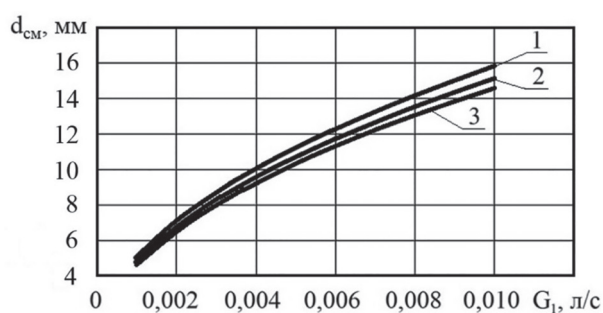


Рис. 5. Зависимость диаметра $d_{см}$ камеры смешения от расхода воды G_1 при давлениях воды, МПа: 1 - $p_1 = 0,25$; 2 - $p_1 = 0,30$; 3 - $p_1 = 0,35$

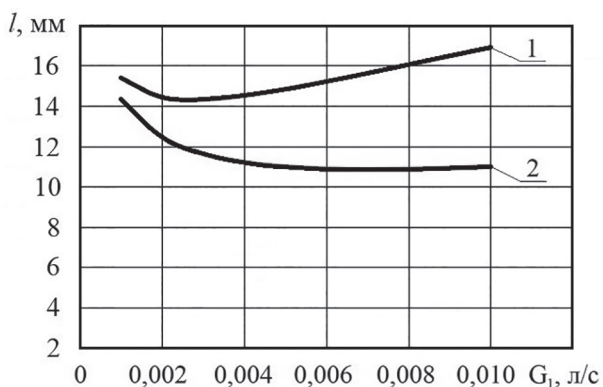


Рис. 6. Зависимость длины камеры смешения l от расхода воды G_1 при давлениях воды, МПа: 1 - $p_1 = 0,25$; 2 - $p_1 = 0,30$

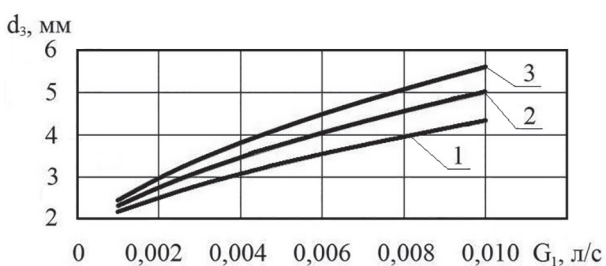


Рис. 7. Зависимость диаметра выходного сопла d_3 от расхода воды G_1 при давлениях воды, МПа: 1 - $p_1 = 0,25$; 2 - $p_1 = 0,30$; 3 - $p_1 = 0,35$

характеристик и угла установки лопаток завихрителя на величину циркуляционных зон, получаемых из соотношений осевой и тангенциальной составляющих скоростей потока. Эти составляющие, в свою очередь, зависят от степени крутки потока, создаваемой завихрителем, которая определяется углом установки его лопаток [20] и, исходя из анализа опытных данных шнековых завихрителей, – наличием поперечной и спиральной накатки, а также проволочным спиральным и ленточным завихрителями [21]. Для этого выходное сопло дождевателя предлагается снабдить на внутренней поверхности выступом в форме двухзаходной винтовой спирали с углом подъема 30° , противоположном направлению закручивания потока воды в камере смешения с воздухом.

Анализ разработанных конструкций спирального завихрителя потока и результаты теоретических исследований позволяют сделать вывод, что их использование незначительно увеличивает гидравлическое сопротивление [22].

Использование воздушной фазы и конструктивно-технологических особенностей устройства для распыления жидкости обеспечивает возможность получения мелкодисперсного дождевания для полива сельскохозяйственных культур, оперативного планирования внесения доз минеральных удобрений, борьбы с болезнями и вредителями растений. При этом оптимальная влажность почвы может быть значительно ниже, чем без применения мелкодисперсного дождевания [23].

Заключение

Создание современных малоэнергоёмких технологий и новых технических средств необходимо для орошения в зонах недостаточного естественного увлажнения, восстановления и эксплуатации мелиоративных систем. Одно из направлений совершенствования полива сельскохозяйственных культур дождеванием – это подача воды – при взаимодействии ее с воздухом на поверхность орошаемого участка, в приземный слой воздуха и растения в виде капель искусственного дождя, создаваемого специальными устройствами-дождевателями.

В статье приведено теоретико-технологическое обоснование конструктивных решений пневмогидравлического распылителя. Разрушение сплошности жидкости рассмотрено с учетом параметра ее прочности при взаимо-

действии гетерогенных фаз воды и воздуха. При этом подача воздуха для распыления жидкости может осуществляться как принудительно, так и эжекцией. Предложена математическая модель работы пневмогидравлического распылителя дождевателя, получены графические зависимости оптимизации технологических параметров и конструктивных решений для разработки макетного образца пневмогидравлического дождевателя и его экспериментальной апробации с целью получения капель искусственного дождя различной крупности при орошении и фертигации сельскохозяйственных культур, что будет способствовать успешному решению обсуждаемых проблем АПК.

Литература

1. Калашников А.А., Жарков В.А., Джумабеков А.А. и др. Дождевательный аппарат: инновационный патент Республики Казахстан № 26143 // Промышленная собственность. Официальный бюллетень. Изобретения. Полезные модели. 2012. № 19.
2. Губская У.А. Инновационные технологии устройств создания искусственного дождя // Совместные воды-совместные действия: мат. научно-практического семинара. Симферополь: Крымский научный центр НАНГ Украины и МОН Украины. 2009. С. 31.
3. Горобей В.П. Устройство для аэрации пульпы при флотации: а.с. № 1748878. СССР. Опубликовано 23.07.92, Бюл. № 27.
4. Зельдович Я.Б. К теории образования новой фазы. Кавитация // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1942. Т. 12. Вып. 11/12. С. 525–538.
5. Fisher J.C. The fracture of liquids // J. Appl. Phys. 1948. V. 19. Pp. 1062–1067.
6. Корнфельд М. Упругость и прочность жидкостей. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1951. 107 с.
7. Флинн Г. Физика акустической кавитации в жидкости // Физическая акустика / под ред. У. Мэзона. Методы и приборы ультразвуковых исследований. М.: Мир, 1967. Т. 1. С. 7–138.
8. Рой Н.А. Возникновение и протекание ультразвуковой кавитации. Обзор // Акуст. журн. 1957. Т. 3. № 1. С. 3–21.
9. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Физика и техника мощного ультразвука. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1968. С. 167–220.
10. Богач А.А., Уткин А.В. Прочность воды при импульсном растяжении // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 4. С. 198–205.
11. Рубинштейн Ю.Б., Горобей В.П., Шадрин Г.Н., Таримов О.Е. Оценка прочностных свойств пен при флотации угля // Кокс и химия. 1993. № 2. С. 9–12.
12. Рубинштейн Ю.Б., Горобей В.П., Шадрин Г.Н., Таримов О.Е. Влияние прочностных свойств пен на оптимизацию реагентного режима флотации угля // Кокс и химия. 1993. № 3. С. 10–12.
13. Кавитация. URL: <http://booksite.ru>fulltext/1/001/008/057>.
14. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия. 1984. 254 с.
15. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
16. Горобей В.П. Пневмогидравлический дождеватель: уведомление о положительном результате формальной экспертизы заявки на изобретение. Российская Федерация, заявка № 2019107468,05(014519), реш. 17.04.19.
17. Справочник конструктора сельскохозяйственных машин. Т. 2. / под ред. инж. А.В. Красниченко. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1961. 862 с.
18. Левицкий Н.И. Теория механизмов и машин. М.: Наука, 1990. 592 с.
19. Каннингэм П.Г., Допкин Р.Ж. Длина участка разрушения струи и смешивающей горловины жидкоструйного насоса для перекачки газа. Теоретические основы инженерных расчетов. М.: Мир, 1974. № 3. С. 128–141.
20. Исаев А.И., Майрович Ю.И., Сафарбаков А.М., Ходацкий С.А. Влияние геометрических характеристик завихрителя на вихревую структуру потока в импульсной камере сгорания // Труды МАИ. Выпуск № 88. URL: www.mai.ru/science/trudy/.
21. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов: учебно-справочное пособие. М.: «Теплотехник». 2011. 335 с.
22. Абезин В.Г., Семенов С.Я., Скрипкин Д.В., Беспалов А.Г. Разработка и обоснование конструкции дождевателя для мобильных дождевательных машин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. 2015. № 1 (37). С. 1–5.
23. Скобельцын Ю.А., Гумбаров А.Д., Сенчуков Г.А. и др. Мелкодисперсное дождевание сельскохозяйственных культур: учебное пособие. Краснодар: КСХИ. 1990. 126 с.

References

- Kalashnikov A. A., ZHarkov V. A., Dzhumabekov A. A. i dr. Dozhdeval'nyj apparat [Sprinkler device]. Inno-vacionnyj patent Respubliki Kazahstan No 26143 Promyshlennaya sobstvennost'. Oficial'nyj byulleten'. Izobreniya. Poleznye modeli. 2012. No 19.
- Gubskaya U.A. Innovative technologies for artificial rain devices. «Sovmestnye vodysovmestnye dejstviya». Mat. nauchno-prakticheskogo seminar [“Joint water means joint action”. Materials of scientific and practical seminar]. Simferopol', Krymskij nauchnyj centr NANG Ukrainy i MON Ukrainy. 2009, pp. 31 (in Russ.).
- Gorobej V.P. Ustrojstvo dlya aeracii pul'py pri flotacii [Aeration device for pulp during flotation]: a.s. No 1748878. SSSR. Opublikovano 23.07.92, Byul. No 27.
- Zel'dovich YA.B. The theory of the formation of a new phase. Cavitation. ZHurn. eksperim. i teoret. fiziki. 1942. Vol. 12. Vyp. 11/12, pp. 525–538 (in Russ.).
- Fisher J.C. The fracture of liquids // J. Appl. Phys. 1948. V. 19. Pp. 1062–1067 (in Russ.).
- Kornfel'd M. Uprugost' i prochnost' zhidkostej [Resilience and durability of liquids]. Moscow; Leningrad: Gostekhteorizdat Publ., 1951. 107 p.
- Flinn G. Fizika akusticheskoy kavitacii v zhidkosti [Physics of acoustic cavitation in a liquid]. Fizicheskaya akustika. Pod red. U. Mezona. Vol. 1. Metody i pribory ul'trazvukovyh issledovanij. Moscow: Mir Publ., 1967, pp. 7–138 (in Russ.).
- Roj N.A. The occurrence and progress of ultrasonic cavitation. Obzor. Akust. zhurn. 1957. Vol. 3. No 1, pp. 3–21.
- Sirotyuk M.G. Experimental studies of ultrasonic cavitation. Fizika i tekhnika moshchnogo ul'trazvuka. Moshchnye ul'trazvukovye polya. Pod red. L.D. Rozenberga. Moscow: Nauka Publ., 1968, pp. 167–220 (in Russ.).
- Bogach A.A., Utkin A.V. The strength of water under pulsed tension. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika. 2000. Vol. 41. No 4, pp. 198–205 (in Russ.).
- Rubinshtejn YU.B., Gorobej V.P., SHadrin G.N., Tarimov O.E. Assessment of the strength properties of foams during coal flotation. Koks i himiya. 1993. No 2, pp. 9–12 (in Russ.).
- Rubinshtejn YU.B., Gorobej V.P., SHadrin G.N., Tarimov O.E. The influence of the strength properties of foams on the optimization of the reagent regime of coal flotation. Koks i himiya. 1993, No 3, pp. 10–12 (in Russ.).
- Kavitaciya [Elektronnyj resurs] URL: <http://book-site.ru/fulltext/1/001/008/057>
- Pazhi D.G., Galustov V.S. Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostej [Basics of spraying liquids technique]. Moscow: Himiya Publ.. 1984. 254 p.
- Sokolov E.YA., Zinger N.M. Strujnye apparaty [Spraying devices]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 352 p.
- Gorobej V.P. Pnevmo gidravlicheskij dozhdevatel' [Pneumatic hydraulic sprinkler]: uvedomlenie o polozhitel'nom rezul'tate formal'noj ekspertizy zayavki na izobrenie. Rossijskaya Federaciya – zayavka No 2019107468,05(014519), resh. 17.04.19.
- Spravochnik konstruktora sel'skohozyajstvennyh mashin [Reference for designer of agricultural machinery]. Pod red. inzh. A.V. Krasnichenko. Vol. 2. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo mashinostroitel'noj literatury, 1961. 862 p.
- Levickij N.I. Teoriya mekhanizmov i mashin [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Nauka Publ., 1990. 592 p.
- Kanningem P.G., Dopkin R.ZH. The length of the destruction section of the jet and mixing neck of the liquid pump for pumping gas. Teoreticheskie osnovy inzhenernyh raschyotov. Moscow: Mir Publ., 1974. No 3, pp. 128–141 (in Russ.).
- Isaev A.I., Majrovich YU.I., Safarbakov A.M., Hodackij S.A. The influence of the geometric characteristics of the swirl on the vortex structure of the flow in a pulsed combustion chamber. Trudy MAI. Vypusk No 88. [Elektronnyj resurs] URL: www.mai.ru/science/trudy/.
- Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M. Metody intensivacii i modelirovaniya teplomassoobmennyyh processov [Methods of intensification and modeling of heat and mass transfer processes]. Uchebno-spravochnoe posobie. Moscow: «Teplotekhnik» Publ., 2011. 335 p.
- Abezin V.G., Semenenko S.YA., Skripkin D.V., Bepalov A.G. Development and justification of the sprinkler design for mobile spraying machinery. Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa. 2015. No 1 (37), pp. 1–5 (in Russ.).
- Skobel'cyn YU.A., Gumbarov A.D., Senchukov G.A. i dr. Melkodispersnoe dozhdevanie sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Fine sprinkling of agricultural crops]. Uchebnoe posobie. Krasnodar, KSKHI Publ. 1990. 126 p.